UNCLASSIFIED

DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT
CENTRE DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE
VALCARTIER, QUÉBEC

DREV - TM - 9826
Unlimited Distribution / Distribution illimitée

IMPLANTATION D'UN SYSTÈME DE VÉLOCIMÉTRIE PAR IMAGE DE PARTICULES (PIV) POUR LA MESURE ET LA VISUALISATION DES ÉCOULEMENTS SUBSONIQUES ET SUPERSONIQUES

by

S. Bouziane

March/ mars 1999

Approved by / Approuvé par

Head, Delivery Systems Section
Chef, Section systèmes de lancement

1 March 99
Date

105-01838/

AVERTISSEMENT

Les renseignements ci-dessus sont la propriété de Sa Majesté et sont communiqués au destinataire, étant entendu qu'ils seront utilisés uniquement à des fins d'information et d'évaluation. Toute utilisation à des fins commerciales, notamment à des fins de fabrication, est interdite. La diffusion de la présente publication ou de son contenu à des tiers est interdite sans le consentement écrit préalable du MDN du Canada.

© Sa Majesté la reine, représentée par le ministre de la Défense nationale, 1999

ABSTRACT

This work is part of a large research program in the area of propulsive flows undertaken by the Propulsion Group at the Defence Research Establishment Valcartier (DREV), in collaboration with the Allied Signal compagny and Laval University. Specifically, this work deals with the implementation of an optically based device to measure the velocity field in subsonic and supersonic flows through (and around) the propulsion systems of aerial vehicles. This measurement device is a Particle Image Velocimetry (PIV) system. A vast number of applications of such an optically based device are possible at DREV for the Canadian Forces. The measurement of the flow in a ducted ramjet combustor as well as the flow around the jet vanes of a thrust vector control system of a solid propellant rocket motor, or the flow around a missile model are some examples which could be achieved by using the technique of particle image velocimetry. The objectives of the installation of such a PIV system are to measure the flow velocity and vorticity at several points of a given plane of measurement simultaneously, and in the same time to obtain the required experimental data for comparison and data validation with the available commercial CFD computing codes. In this context, different possible options to implement the new measurement method were studied. In particular, advantages and disavantages of each option are underlined in this memorandum. During this step, efforts were focused on the most possible convenient way to implement a PIV system, keeping in mind the best installation cost and the objectives to be achieved. A general definition of a PIV system and the selected components to suit our particular needs, as well as the commercial PIV system chosen for this project are both described in this document.

RÉSUMÉ

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de recherche dans le domaine des écoulements propulsifs dirigé par le Groupe Propulsion du CRDV, en collaboration avec la compagnie Allied Signal et l'Université Laval. Il porte plus précisément sur l'implantation au CRDV d'un outil métrologique de type optique adapté pour la mesure du champ de vitesse dans les écoulements subsoniques et supersoniques se développant dans (et autour) des organes de propulsion des véhicules volants. Il s'agit précisément d'un système de vélocimétrie laser par image de particules (PIV). Au CRDV, les applications pratiques de ce type de métrologie au profit des Forces canadiennes sont multiples. À titre d'exemple, on peut citer la mesure du champ de vitesse de l'écoulement dans la chambre de combustion d'une statofusée, autour des ailettes de guidage équipant la tuyère d'une fusée à propergol solide, de même qu'autour des profils aérodynamiques, tels que des modèles de missiles. L'objectif d'installation d'un tel outil est de pouvoir effectuer la mesure du champ de vitesse partout dans le domaine de mesure d'intérêt de façon simultanée et, par la même occasion, disposer de données expérimentales pour la validation des codes et des calculs numériques (CFD) existants. S'agissant de l'implantation d'un nouvel outil de mesure, plusieurs options possibles ont été étudiées. En particulier, ce mémorandum présente les avantages et inconvénients associés à chacune des démarches possibles, ainsi que la solution retenue. La démarche adoptée dans le cadre de ce projet consistait à déterminer la voie la plus commode possible aussi

bien au point de vue coût d'installation qu'au point de vue réalisation des objectifs visés. Une description générale du système de mesure complet est fournie dans ce document. L'accent est placée sur la définition et la sélection des composants pour nos besoins particuliers, et enfin le type de système PIV commercial retenu dans le cadre de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

	ABSTRACT/RÉSUMÉ	i
	FICHE DE SYNTHÈSE	v
1.0	INTRODUCTION	1
2.0	DÉFINITION DES COMPOSANTS D'UN SYSTÈME PIV	2
	2.1 Champ d'application du PIV au CRDV	5
3.0	OPTIONS POUR L'IMPLANTATION D'UN SYSTÈME PIV	6
	3.1 Séminaire sur la technique PIV et visite à l'Univesité McGill	8
4.0	TYPE DE SOLUTION ADAPTÉE À NOS BESOINS	10
	4.1 Choix d'un système PIV commercial	11
	4.2 Système PIV commercial retenu	14
	4.3 Motivations pour le choix d'une solution commerciale	16
	4.4 Justification du choix de la puissance du laser du système PIV	18
	4.5 Note sur la soufflerie trisonique	20
5.0	SOLUTION PROVISOIRE POUR LE TUNNEL À EAU	20
	5.1 Les éléments clés de réalisation d'une telle solution	22
	5.2 Nécessité d'un logiciel adapté pour le traitement d'images PIV	23
	5.3 Choix de la méthode d'acquistion et de traitement des images PIV	24
	5.4 Ensemencement de l'écoulement	25
	5.5 Remarques	26
6.0	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	26
7.0	REMERCIEMENTS	28
8.0	RÉFÉRENCES	29
	ANNEXE A - Système PIV FlowMaster de LaVision	

FICHE DE SYNTHÈSE

À l'heure des nouvelles technologies, la mécanique des fluides n'en demeure pas moins un domaine où l'application des techniques expérimentales de plus en plus sophistiquées est en progrès constant. Le recours à de telles techniques pour les besoins de la recherche et de l'industrie est directement dicté par les exigences et le désir à la fois de l'ingénieur et du chercheur d'obtenir des mesures de plus en plus fiables et précises, mais aussi réalisables en un temps très court (donc à un coût réduit), et permettant de recueillir simultanément l'information requise en plusieurs points de l'espace de mesure. Parmi ces nouvelles techniques de mesure en mécanique des fluides, la vélocimétrie par image de particules, communément appelée PIV («Particle Image Velocimetry») répond parfaitement à ces besoins. Cette technique basée sur l'application de l'analyse d'image permet en plus de la visualisation des trajectoires du fluide, de quantifier la vitesse des particules de fluide instantanément en plusieurs points. C'est dans ce contexte que l'idée d'implanter cette nouvelle technique au CRDV a émergé au sein du groupe de recherche en propulsion. Précisément, le projet est dirigé par ce groupe de recherche en collaboration avec la compagnie Allied Signal, d'une part, et l'université Laval, d'autre part.

La vélocimétrie par images de particules est une nouveauté au CRDV qui viendra compléter les méthodes de visualisation et de calcul numérique déjà existantes mises au point par les chercheurs du groupe. La complémentarité de cette technique réside dans le fait qu'elle offrira la possibilité de mesurer les grandeurs aérodynamiques d'un écoulement, en particulier le champ de vitesse, et le champ de vorticité. Un des avantages de cette méthode de mesure, dont le principe est basé sur les concepts statistiques en analyse d'image, c'est son vaste champ d'application allant des écoulements extérieurs (écoulements autour d'objets ou de véhicules volants) aux écoulements intérieurs (écoulements autour de profils de turbomachines, par exemple, ou à l'intérieur d'organes de véhicules volants).

Comme il s'agit de l'implantation d'un outil métrologique, plusieurs possibilités s'offrent à nous. On discutera de chacune des options qui permet de réaliser l'objectif, ses avantages et ses inconvénients. Parmi celles-ci, on a opté pour une solution qui tient compte à la fois des coûts pouvant être défrayés et la réalisation des objectifs visés. Cette solution consiste à installer un système PIV intégré de type commercial, puisque c'est la voie la plus prometteuse à court et à long terme. Après la définition globale d'un système PIV, on s'intéressera à la définition et à la sélection des différents composants du système adapté aux différentes applications particulières au CRDV au profit des Forces canadiennes. Ce mémorandum souligne en particulier les recommandations techniques relatives au système PIV à implanter au CRDV.

1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre d'un vaste programme de recherche sur la caractérisation des écoulements propulsifs au CRDV, l'installation d'un système de vélocimétrie par image de particules (PIV) est devenue une nécessité. Ce système optique est destiné à la mesure aussi bien des écoulements subsoniques (dans l'eau ou dans l'air) que supersoniques. Le double avantage de cette technique de mesure permettant à la fois de réaliser des visualisations qualitatives et quantitatives lui confère le rôle d'une des méthodes les plus répandues actuellement dans le domaine de la recherche et du développement mais aussi en industrie. En fait, cette méthode de mesure vient résoudre les inconvénients de la vélocimétrie laser classique que sont: un temps de mise en oeuvre relativement long et une mesure réduite à un relevé point par point. Contrairement à la vélocimétrie laser classique, la vélocimétrie par image de particules permet d'accéder à la mesure du champ de vitesse d'écoulement partout dans le domaine de mesure et ceci de façon instantanée. Cela se fait simplement à partir de la corrélation de deux images successives des particules de fluide; les deux images étant séparées par un court laps de temps en assimilant ici une particule d'ensemencement à une particule de fluide. Le principe général de la technique PIV est bien décrit dans les réf. 1 et 2, alors qu'une revue récente de la méthode ainsi que la généralisation de son champ d'application sont données à la réf. 3. La réf. 4 donne une bonne description du fondement théorique de cette technique.

En résumé, l'écoulement est ensemencé par des particules de taille soigneusement choisie pour ne pas perturber l'écoulement de telle sorte qu'elles suivent approximativement une ligne de courant (force de gravité négligeable), d'une part. D'autre part, les particules d'ensemencement doivent également réfléchir suffisamment la lumière pour être clairement figées sur une image prise par une caméra rapide. Pour extraire le champ de vitesse des particules à l'aide d'un procédé d'analyse statistique, deux images successives sont nécessaires. À partir de ces deux images en cascade, il est possible de déterminer la distance parcourue par une particule de fluide entre la position de la première image et celle de la seconde. Connaissant le temps séparant les deux images et la distance parcourue entre-temps par les particules, il est facile d'en déduire la

vitesse. Ainsi la vitesse dans une direction donnée est calculée en divisant la distance dans cette direction par le délai entre les deux images.

Le but de ces mesures est la compréhension des écoulements qui se développent autour et dans certaines configurations aérodynamiques d'intérêt pour ensuite disposer de données expérimentales pour la validation des codes de calculs numériques disponibles au CRDV. La conjugaison et la complémentarité de ces deux voies d'investigation, à la fois numérique et expérimentale, permettent de faire des prédictions plus précises lors de la phase de dessin de ces configurations et d'améliorer ainsi les performances des prototypes.

Dans ce qui suit, on donne un compte rendu de l'état d'avancement du projet, en particulier en ce qui a trait aux différentes démarches effectuées en ce sens, ainsi que la définition et la description du matériel requis pour le système de mesure à installer. La solution retenue pour les applications particulières au CRDV a été déterminée à partir des recherches bibliographiques effectuées, de l'information recueillie auprès d'organismes spécialisés ou commerciaux dans le domaine des systèmes PIV, ainsi qu'à partir de quelques visites effectuées dans certains laboratoires de recherches universitaires oeuvrant dans ce domaine; en particulier, le Laboratoire de mécanique des fluides et d'aérodynamique de l'Université McGill à Montréal.

Ce travail a été effectué au CRDV entre avril et août 1998 dans le cadre du projet 3ea22 intitulé «Jet Vane Thrust Vector Control» ou dispositif de contrôle du vecteur-poussée (CVP) à multiples déflecteurs pour moteurs-fusées.

2.0 DÉFINITION DES COMPOSANTS D'UN SYSTÈME PIV

Compte tenu des besoins en matière de données expérimentales d'une part, et des contraintes financières d'autre part, le système PIV à implanter doit être capable d'effectuer des mesures à la fois dans des écoulements subsoniques (dans l'eau et dans

l'air) et supersoniques pour des nombres de Mach de l'ordre de 3. Globalement, voici en quoi consiste les différents composants d'un système PIV:

1- un système d'éclairage de l'écoulement, soit un laser pulsé d'une certaine puissance et une optique de transmission du faisceau laser et sa distribution cohérente dans la section de mesure retenue. Le laser doit produire un certain nombre d'impulsions par seconde. À chaque impulsion d'une certaine énergie, il y a prise d'une photo par une caméra rapide directement synchronisée avec le laser. Pour effectuer l'analyse des images PIV, il est nécessaire de prendre deux photos successives séparées par un court laps de temps. Les deux photos successives peuvent être prises sur un même support ou dans le même cliché par double exposition. Dans ce cas, la méthode d'analyse d'image appliquée au dépouillement des prises de vue se nomme l'autocorrélation (voir les réf. 1, 2, 5 et 6). Cette méthode présente le problème de détermination de la direction de vitesse. En effet, dans n'importe quelle fenêtre d'interrogation du support d'image, il n'est pas possible de savoir quelle particule correspond au premier instant de prise de vue et celle qui correspond au second. Pour lever cette ambiguïté de direction, on procède de la même manière que dans le cas de l'anémométrie laser Doppler (LDA), la vitesse est alors déterminée par rapport à une référence connue non nulle. Un tel procédé connu sous le nom de décalage d'image (réf. 2), consiste à ajouter un déplacement positif à la seconde prise de vue grâce à un dispositif approprié généralement un miroir rotatif inséré dans la chaîne optique. La valeur de ce déplacement doit être supérieure à la vitesse maximale dans le tourbillon à mesurer, ce qui signifie que ce déplacement doit inclure au moins la taille du tourbillon qu'on mesure (la fréquence du tourbillon peut jouer aussi un rôle). Le déplacement qu'on induit correspond en fait à une vitesse supplémentaire partout sur la carte des vecteurs de vitesse qui résulte de l'analyse d'images. Pour obtenir la vraie carte de répartition de vitesse, il suffit de soustraire cette vitesse supplémentaire des vecteurs de vitesse obtenus.

Les deux photos PIV peuvent être également figées sur deux supports ou deux clichés différents et, dans ce cas, on applique l'analyse dite corrélation croisée ou la technique d'intercorrélation pour le calcul des déplacements des particules de fluide et

ensuite la vitesse de l'écoulement. La théorie d'une telle méthode est décrite à la réf. 7. Notons que l'ambiguïté de direction n'existe pas dans ce cas. Le choix du délai entre deux impulsions laser successives est important. En effet, plus la gamme dans laquelle il est possible de régler ce délai librement est grande, plus le laser est flexible pour la mesure de différentes gammes de vitesses de fluide. C'est précisément le cas des applications au CRDV, car on désire mesurer des vitesses dans une gamme allant jusqu'à environ 850 m/s.

2- un système d'ensemencement, incluant un dispositif d'injection de particules de différents types et tailles selon le type de fluide utilisé (eau ou air) et en fonction de l'importance de la vitesse d'écoulement.

3- une caméra rapide de type CCD pour figer l'image des particules injectées dans le fluide à mesurer. Les prises de vue de la caméra doivent être synchronisées avec les impulsions successives du faisceau laser. Notons que l'avenir est à la généralisation de la PIV par la l'utilisation de la caméra CCD et l'emploi de la méthode de traitement d'image d'intercorrélation ou corrélation croisée.

4- un synchroniseur de la caméra et du laser;

5- un logiciel permettant à la fois, le contrôle et le pilotage du système de mesure complet, l'acquisition des images, ainsi que le traitement et le post-traitement des données. Il est préférable, dans la mesure du possible, que le logiciel soit flexible du point de vue compatibilité de matériels électroniques divers. Autrement dit, il est toujours souhaitable que le logiciel source de contrôle et de traitement d'image soit accessible à la programmation, le cas échéant, lorsque l'utilisateur désire contrôler des instruments périphériques maison.

Notons aussi que dans le cas de l'emploi de la méthode d'autocorrélation, le système combiné d'éclairage et de prise d'images peut incorporer un système complémentaire à miroir rotatif permettant la résolution du problème d'ambiguïté de

direction de vitesse que posent les écoulements tourbillonnaires (décollement, écoulement de retour, tourbillon de coin, etc.). Dans le cas d'un système PIV commercial comme celui de TSI, par exemple, ce sous-système de résolution d'ambiguïté de direction est partie intégrante du système global (voir réf. 2 et 8). Il existe cependant d'autres méthodes de résolution du problème d'ambiguïté, comme l'utilisation d'une source de lumière composée de deux couleurs différentes, par exemple le rouge et le vert, ce qui permet de distinguer dans une zone de tourbillon ou de recirculation de fluide la position des particules de fluide à l'instant de la première prise de vue et à l'instant de la seconde. Une telle méthode est décrite à la réf. 9.

2.1 Champ d'application du PIV au CRDV

L'implantation du système PIV doit pouvoir permettre d'effectuer des mesures à très basse vitesse, en particulier dans un modèle de chambre de combustion d'une statofusée, d'une part, et dans un modèle de tuyère convergente divergente d'autre part, qui peuvent être testées séparément dans un tunnel à eau présentement en usage au CRDV. Les mesures à basse vitesse dans l'eau sont choisies comme point de départ compte tenu de la simplicité d'ensemencement dans ce milieu, d'une part, et de l'avantage de la faible vitesse, d'autre part, réduisant ainsi les problèmes de synchronisation du système, puisque les délais entre les prises de vue sont relativement plus longs. Au-delà de la mise en place du système, cette phase d'essais aura pour objectif de mettre en oeuvre la technique de mesure et de tester les qualités du système implanté. Ces tests devront donc, entre autres, permettre la mise en fonction du système PIV, d'établir les règles adéquates de son utilisation sécuritaire compte tenu de la forte puissance du laser utilisé, ainsi que la préparation des outils nécessaires pour la mesure des écoulements à haute vitesse.

Comme toute méthode de mesure, la technique PIV n'est pas totalement exempte de difficultés pour une application donnée. Ces difficultés peuvent être de nature optique, comme les problèmes de réflexion de lumière sur des surfaces transparentes, de distorsion d'image par suite de la variation d'indice de réfraction du milieu à mesurer ou

de défauts d'alignement optique. Le mode d'ensemencement et le réglage de la concentration des particules sont tributaires de la vitesse d'écoulement à mesurer et nécessitent dans la plupart des cas une attention particulière. Enfin, le traitement d'images, le dépouillement et l'interprétation des résultats ensuite nécessitent également une grande attention, et cela sans égard au type de logiciel de traitement utilisé. Soulignons cependant que le degré de difficulté d'une configuration d'essai donnée dépend de la forme géométrique étudiée et des phénomènes physiques mis en jeu.

Dans ce contexte, le passage des essais à très basse vitesse vers des essais à des vitesses de plus en plus élevées doit se faire de façon graduelle en fonction du degré de maîtrise de l'instrument de mesure et du degré de contournement des difficultés soulignées précédemment. Compte tenu des raisons ci-dessus, on pourrait alors envisager des mesures PIV en supersonique d'ici deux ans eu égard aux exigences techniques inhérents au régime supersonique. Ces tests porteront en particulier sur la mesure du champ d'écoulement dans la tuyère supersonique d'une fusée à propergol solide (projet «Jet Vane Trust Vector Control»), ainsi que sur les tests de modèles de profils ou de véhicules aérodynamiques dans la soufflerie trisonique du CRDV. Les travaux particuliers pour la conception du banc d'essai à l'air supersonique pour le test de la tuyère et les modifications requises de la section d'essai pour la soufflerie trisonique peuvent être envisagés dans cette période.

3.0 OPTIONS POUR L'IMPLANTATION D'UN SYSTÈME PIV

Le choix d'un système PIV et donc ses différents composants nécessite beaucoup d'attention. À l'heure actuelle, il n'y a pas de méthode analytique fondamentale qui permettrait de déterminer plus facilement le système qui convient à chaque type d'application. De même, il n'existe pas de système PIV universellement valable pour toutes les applications possibles et imaginaires. Autrement dit, chaque application nécessite des choix particuliers des composants et leurs caractéristiques tenant compte à la fois de la nature des objectifs à réaliser et des contraintes à surmonter. Généralement, ces choix sont tranchés grâce à l'expérience d'autres chercheurs travaillant déjà dans ce

domaine, par la compilation de données fournies dans les publications et par la cueillette d'information auprès d'organismes privés ou publics qui mettent au point et commercialisent des systèmes PIV prêts à être utilisés. D'autre part, lors du choix des composants, beaucoup de paramètres varient les uns en fonction des autres et on est souvent amené à faire un compromis entre les objectifs visés et les coûts que l'on est en mesure de payer.

Aussi, afin de mettre sur pied un système PIV et de le rendre fonctionnel, trois voies sont possibles:

1- Développer complètement une chaîne de mesure maison: il s'agit d'une procédure très laborieuse et longue (s'étendant sur plusieurs années), généralement adoptée par un certain nombre d'institutions universitaires. Elle possède cependant un inconvénient de taille qui est celui des délais trop longs qu'exige la mise au point de la méthode, notamment pour le chercheur qui vise des résultats à court et moyen terme. Elle pourrait également s'avérer coûteuse à long terme.

2- À l'opposé, on peut trouver des systèmes PIV de type commercial directement utilisables avec un minimum de développement. En effet tous les systèmes disponibles sur le marché ne font pas forcément tout ce que nécessite une application particulière. À titre d'exemple, TSI et DANTEC, deux compagnies américaines spécialisées dans le domaine de l'instrumentation de mesure, présentent chacune un système intégré très évolué. Ces systèmes sont, à certains égards, comparables même si toutefois la première compagnie possède plusieurs années d'avance dans le domaine du PIV. L'avantage de cette voie: une économie de temps énorme dans la réalisation des objectifs visés. Cependant, le prix de ces systèmes commerciaux ne correspond pas toujours aux budgets disponibles. En particulier, les coûts augmentent avec le degré de flexibilité exigée du système. Par exemple, un système PIV permettant d'effectuer des mesures à basse vitesse dans l'eau est moins cher qu'un système qui serait utilisé à la fois pour des mesures à basse et à grande vitesse (supersonique). Cette voie parait cependant plus prometteuse. En effet, certains auteurs d'expérience (réf. 10) suggèrent fortement une telle voie à ceux

et celles qui débutent dans la technique PIV. Il faut aussi mentionner que cette technique est en perpétuel développement en raison essentiellement des progrès constants dans le domaine de l'informatique, de l'électronique et de l'électro-optique. Il n'y a donc pas de solution standard pour le moment, et cela signifie qu'une solution donnée qui serait très bonne aujourd'hui ne serait pas forcément celle à choisir demain.

3- Entre les deux voies ci-dessus, il existerait une option intermédiaire qui consisterait à recourir à l'achat des composants les plus importants du système, comme le laser, la caméra, et le logiciel d'acquisition et de traitement des données; l'électronique de synchronisation de la caméra et du laser devrait alors être à mettre au point par l'utilisateur. Cette option peut nécessiter un certain investissement de temps. Également, dans ce type de solution, étant donné que la chaîne de mesure serait à bâtir par "morceaux", la question de compatibilité de matériel est un facteur déterminant dans la sélection des composants du système et donc dans le choix du fournisseur.

3.1 Séminaire et visite à l'Université McGill

Un séminaire d'une journée sur les systèmes de mesure PIV a été organisé le 12 mai 1998 à l'Université McGill par la compagnie américaine TSI, spécialisée en instrumentation appliquée à la mécanique des fluides.

Ce séminaire a permis de mieux cerner certains détails du fonctionnement d'un système PIV en général, et en particulier le système commercial offert par cette compagnie. Il s'agit d'un système fonctionnel intégrant les composants de base d'un système PIV avec, en option, quelques outils pour des applications particulières.

La présentation théorique et pratique ont permis de mieux voir l'importance des composants optiques dans le système global. Certains détails, comme le choix de l'énergie du laser nécessaire pour la mesure des écoulements à haute vitesse (qui doit être supérieure à 200 mJ/impulsion), le choix du type de caméra (Camera CCD), ainsi que la synchronisation de ces composants, ont été bien soulignés.

Une démonstration sur un banc d'essai d'école intégrant l'ensemble des composants du système PIV a été donnée. L'accent était mis sur les étalonnages préliminaires pour la détermination du facteur de grandissement entre le plan image (pellicule photographique ou matrice CCD, dans ce cas) et le plan objet de l'écoulement (plan de mesure), ainsi que sur les opérations de l'alignement optique. L'acquisition et le traitement des images par la méthode d'intercorrélation sont effectuées en mode interactif. On observe ensuite le dépouillement des images et l'affichage des vecteurs vitesse dans la fenêtre de mesure à l'aide du logiciel INSIGHT, mis au point par TSI. En plus du champ de vitesse, le logiciel permet d'accéder à d'autres paramètres de l'écoulement mesuré, comme la vorticité du champ de vitesse en un point donné. En dépit de son coût, la convivialité de ce logiciel milite en sa faveur.

Le système de TSI montré à la fig.1 offre une flexibilité au niveau optique, aussi bien pour les lasers à faible énergie que pour les lasers à forte énergie. Pour les lasers à faible énergie destinés à la mesure des écoulements à basse vitesse, le rayon laser est acheminé par fibre optique jusqu'au bloc de lentilles chargé de diverger le faisceau et de générer la feuille de lumière (dont l'épaisseur doit être inférieur à 1 mm). Lorsque l'énergie du laser devient forte (c'est le cas de la mesure des écoulements à grande vitesse), la fibre optique devient difficile à utiliser et la lumière du laser est alors acheminée vers le plan de mesure grâce à un bras mécanique articulé (réf. 8). Ce dernier est équipé de miroirs et de lentilles soigneusement étudiés et aménagés pour générer la feuille de lumière selon les dimensions voulues. Ce bras articulé est très maniable et permet d'accéder à la mesure aux endroits désirés. En particulier, sa dextérité offre plusieurs degrés de liberté, ce qui permet l'éclairage des plans de mesure à accès limité. La caméra est montée sur un siège offrant des possibilités de positionnement relativement confortables pour être perpendiculaire à la section de mesure.

Par ailleurs, dans le cadre de ce séminaire, on a pu également visité les installations de mesures PIV du laboratoire de mécanique des fluides et d'aérodynamique de l'Université McGill. Il s'agit d'un tunnel à eau où l'on s'intéresse à la mesure du profil

de vitesse dans une section carrée, y compris les vitesses à la couche limite. Les ordres de grandeurs des vitesses sont très faibles, soit autour de quelque millimètres par seconde. Le système PIV utilisé, de type commercial a été acheté chez DANTEC il y a quelques années. Ce système est relativement vieux par rapport à celui commercialisé aujourd'hui par la même compagnie. Cependant, quelques éléments du système présentent un certain intérêt; en particulier, l'acheminement du faisceau laser jusqu'à la veine d'essai par fibre optique. Seule les lentilles permettant de créer la divergence du faisceau laser et l'obtention de la feuille de lumière nécessaire à l'éclairage de la zone à mesurer sont intégrées à un ensemble compact qui peut être positionné librement et presque sans contrainte à l'endroit désiré. Cette solution très attrayante facilite le problème d'éclairage dans les endroits à accès limité et offre plus de flexibilité quant au choix du domaine à mesurer. Notons par ailleurs que l'installation de ce système PIV et sa mise en fonction a nécessité au moins six mois.

Le deuxième système PIV est en cours de mise au point, notamment sur le plan optique, à savoir le guidage du faisceau laser vers la veine d'essai. Ce système équipe une soufflerie à veine ouverte où l'on s'intéresse à la mesure de la turbulence près de la paroi. La vitesse maximale dans l'écoulement extérieur est de l'ordre de 50 m/s. Ce travail est destiné à encadrer des projets de premier, de second et de troisième cycle sur une période indéterminée. On utilise un laser puissant de marque Continuum délivrant une énergie de 300 mJ par impulsion. Pour le traitement des données, on utilise un module du logiciel VISIFLOW mis au point par AEA Technology, la partie acquisition reste à concevoir par les chercheurs du laboratoire. Le démarrage du projet a débuté il y a huit mois et sa concrétisation pourrait s'étendre sur plusieurs années.

4.0 TYPE DE SOLUTION ADAPTÉE À NOS BESOINS

Le système PIV à installer au CRDV doit permettre à la fois d'effectuer des mesures à basse et à grande vitesse. D'emblée, on peut dire qu'un système PIV adapté à la mesure des vitesses supersoniques le sera sans doute également pour celle des vitesses subsoniques. Cependant l'inverse n'est pas vrai, car dans le cas des hautes vitesses, les

phénomènes de compressibilité (ondes de choc, variation de densité et de température dans la veine d'essai, etc.) rend le concept de mesure particulièrement difficile à réaliser, notamment si la quantité d'énergie nécessaire à l'éclairage des particules injectées est insuffisante. Ceci vient du fait qu'en supersonique, on est généralement en présence de très forts gradients de vitesse et de densité locaux, parfois très aigus, qui imposent un choix de particules d'ensemencement de taille extrêmement petite afin que celles-ci suivent fidèlement les lignes de courant. Typiquement, le diamètre des particules est inférieur à 1 µm dans le cas de particules de dioxyde de titane (TiO_2) ou dans les cas de gouttelettes d'huile d'olive. Le diamètre moyen de ces particules peut aller jusqu'à 0,2 µm. Ainsi, le choix d'un laser puissant pour la mesure des écoulements à grande vitesse est nécessaire afin de pouvoir éclairer suffisamment les particules et les figer sur une photo. La synchronisation des impulsions du laser et du temps d'ouverture de la caméra sont aussi des critères à déterminer soigneusement.

Il est donc clair qu'on est en présence de nombreux paramètres importants qui dépendent à un certain degré les uns des autres. La littérature aide cependant à décider d'une solution acceptable, comme on le verra à la section 4.4 pour le choix de la puissance du laser.

4.1 Choix d'un système PIV commercial

On a précisé précédemment les raisons pour lesquelles il apparaît plus commode d'opter pour l'achat d'un système PIV commercial. Certaines raisons qui justifient ce choix ont été expliquées précédemment. D'autres motivations pour un tel choix sont également énoncées ci-dessous à la section 4.3.

Parmi les firmes qui commercialisent des systèmes PIV complets, on peut citer TSI, DANTEC, Optical Flow System et LaVision. Notons que d'une firme à l'autre, la flexibilité et la capacité du système offert ne sont pas forcément les mêmes et les coûts affichés vont de pair.

On a choisi de décrire ici de façon succincte le système PIV offert par TSI montré à la fig. 1. La fig. 2 donne un aperçu des caractéristiques des composants de ce système. Si on devait choisir ce système, les composants doivent posséder les caractéristiques suivantes:

1- Le laser de type «dual Nd:Yag», de 100 à 200 mJ de puissance et de fréquence 10 ou 15 Hz, incluant les accessoires optiques pour l'alignement et la divergence du faisceau laser. Le laser doit pouvoir permettre le réglage du temps entre deux impulsions successives de l'ordre d'une microseconde, voire d'une nanoseconde. L'énergie par impulsion doit aussi être réglable sur une gamme suffisante pour permettre d'effectuer les mesures en subsonique ou en supersonique, soit de 5 à 200 mJ. L'avantage de l'option «integrated dual Nd-Yag Laser system», c'est qu'elle permet de générer des délais courts entre deux impulsions avec une énergie suffisante par impulsion; ce qui augmente la gamme mesurable des vitesses dynamiques. Le système offert par TSI est capable de mesurer des vitesses jusqu'à 1000 m/s.

2- Une caméra de type CCD, à savoir «PIVCAM 10-30 Cross/Autocorrelation CCD Camera (1024x1024 pixel), 30 frames/s», avec l'interface «High speed CCD camera interface, Digital input, PCI Bus» incluant tous les câbles, ainsi que les lentilles requises pour un champ de vision de 50x100 mm^2 à 100x100 mm^2. La méthode d'intercorrélation peut être avantageusement utilisée.

3- Le synchroniseur des impulsions du laser avec l'ouverture de la caméra.

4- Le logiciel de contrôle, d'acquisition, de traitement et de post-traitement des données INSIGHT, version Windows NT.

5- Un bras optique de longueur suffisante est préférable pour le positionnement adéquat de l'éclairage aux endroits désirés. Ce bras est utile pour mesurer les écoulements dans les plans géométriques gauches, ainsi que dans les endroits où l'encombrement est essentiellement un inconvénient

SANS CLASSIFICATION
13

POWERVIEW
PIV SYSTEM

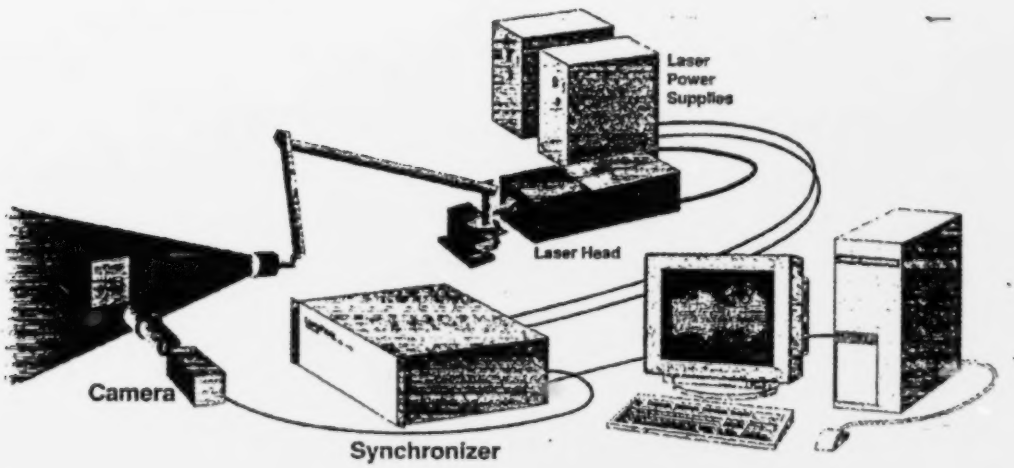


Illustration shows the POWERVIEW PIV system.

TSI's POWERVIEW™ PIV systems represent the state-of-the-art in PIV technology. These systems include the latest high resolution, high frame-rate CCD cameras; high speed CCD camera interface; and fast, powerful, Windows NT®-based processing systems.

Key features of the POWERVIEW PIV systems include:

- High resolution PIVCAM 10-30 CCD camera with 30 frames per second
- Crosscorrelation analysis to obtain vector field
- Flexible "open architecture" and continuous upgrade path
- Real-time image transfer to host computer memory
- High speed—full vector field processed and displayed in fraction of a second
- Batch processing of up to 1,000 sequential images
- Integrated, dual-pulse laser system—pulse rate matched to camera
- All system operations under software control

FIGURE 1- Système PIV PowerView de TSI et ses composants

Typical POWERVIEW PIV system (Core Components)

Y12-15	LASERPULSE™ integrated dual Nd:YAG laser system, 12mJ per pulse, 15 Hz
610032	LASERPULSE Synchronizer
610015	LASERPULSE Light Arm
630046	PIVCAM 10-30 Cross/Autocorrelation CCD Camera (1024 × 1024 pixels, 30 frames/sec)
600067	High speed CCD camera interface
600031-NT	INSIGHT-NT™ PIV Software for Windows NT®
600052	Pentium-based computer system

Optional System Components

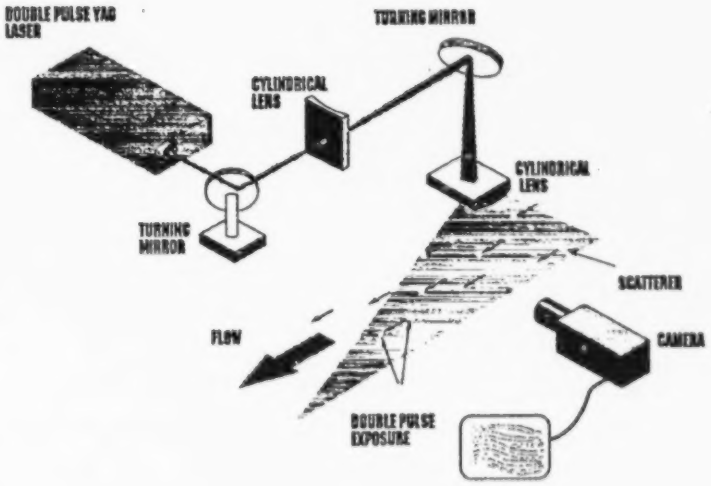
Y25-20	LASERPULSE™ integrated dual Nd:YAG laser system, 25mJ per pulse, 20 Hz
Y50-15	LASERPULSE™ integrated dual Nd:YAG laser system, 50mJ per pulse, 15 Hz
Y200-2	Integrated dual Nd:YAG laser system, 200mJ per pulse, 10 Hz
Y400-2	Integrated dual Nd:YAG laser system, 400mJ per pulse, 10 Hz
630042	Megaplus® 1.4i CCD camera (1340 × 1037 pixels)
630043	Megaplus 4.2i CCD camera (2368 × 2048 pixels)
610040	35-mm photographic camera system
600201	35-mm film scanner
610050	LASERPULSE rotating mirror image shift system
610056	LASERPULSE high speed spinning mirror image shift system

FIGURE 2- Caractéristiques générales des composants du système PIV de TSI

4.2 Système PIV commercial retenu

À qualité comparable, le choix final d'un système PIV commercial dépend du coût qu'on peut payer. Parmi les systèmes PIV mentionnés précédemment, seul le système «FlowMaster3 PIV System», offert par la firme allemande LaVision, était abordable au point de vue coût, et c'est le système qui a été retenu ici. Le système offert par la firme TSI présente certainement des qualités supérieures; cependant, il n'a pas été retenu essentiellement en raison de son coût relativement élevé par rapport au budget dont on dispose. Le système de la firme LaVision est montré aux fig. 3 et 4. Il possède les composants de base requis en PIV. Certains de ses éléments sont comparables à ceux du système de TSI avec, bien entendu, des différences globales au niveau de la caméra de prise d'images, du logiciel de traitement d'images et du dispositif de collecte de la lumière du laser et son acheminement vers la section de mesure. On a inclus à l'annexe A la liste des éléments qui composent ce système et quelques informations au sujet des capacités du logiciel «Davis 5» d'acquisition et de traitement des images PIV. Notons que ce

système n'inclut pas de bras articulé pour acheminer le faisceau laser vers les plans de mesure difficile d'accès. Un tel avantage est cependant offert par le système de TSI. La fig. 3 donne un aperçu de l'agencement général du système PIV de LaViSion.



PIV Experimental Set-up.

FIGURE 3- Agencement général des composants du système PIV FlowMaster de LaVision

Le système présente un avantage certain au niveau de la caméra CCD SensiCam, offrant une vitesse de prise d'images supérieure et permettant des temps entre deux images successives de l'ordre de 200 ns. Ce type de caméra possède aussi une sensibilité élevée. Elle est dix fois plus sensible qu'une caméra vidéo de 8 bits. Cette caractéristique est très intéressante, notamment pour les particules d'ensemencement de très faible taille comme c'est le cas en supersonique. Toutes ces qualités lui confèrent le rôle d'une caméra très adaptée à la mesure des écoulements à haute vitesse, mais aussi à basse vitesse.

FIGURE 4- Vue générale du système PIV FlowMaster de LaVision

Le logiciel Davis 5 offre une flexibilité acceptable. Des essais de validation et de vérification de la performance de ce logiciel ont été effectués sur une version de démonstration grâce à des images PIV disponibles. Certaines de ces images PIV avec les vecteurs vitesses obtenues par d'autres logiciels ont été sélectionnés sur des sites Internet. Par ailleurs, des images PIV ont été prises à l'aide d'une caméra CCD dans le tunnel à eau et ont été dépouillées à l'aide du logiciel Davis 5. Le logiciel a été testé aussi bien en mode d'autocorrélation qu'en mode d'intercorrélation. Les résultats obtenus montrent que le logiciel présente des capacités satisfaisantes pour les besoins recherchés. Toutefois, le mode d'intercorrélation semble fournir des résultats plus tangibles.

4.3 Motivations pour le choix d'une solution commerciale

La technique PIV est très adaptée pour le diagnostic rapide des écoulements de fluide. Il s'agit d'un domaine en pleine évolution qui exige de la part du profane une attention particulière. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que cette technique de mesure demeure avant tout un outil de travail qu'il convient de mieux utiliser pour

acquérir les données expérimentales recherchées. En optant pour un système PIV commercial, en plus des points positifs mentionnés précédemment, il en découle aussi les avantages suivants:

1- Plus la démarche vers l'installation du système PIV complet est simplifiée, plus elle va engendrer une économie de temps importante. Ceci permettra d'acquérir des résultats dans des délais raisonnables et de publier les travaux de recherche. Ce facteur milite directement en faveur d'un système commercial.

2- L'économie de temps générée permet de bien assimiler la technique nouvellement installée et d'acquérir une expérience à fur et à mesure que l'on avance dans les travaux de recherche. Ceci permettra également de songer à des solutions pour des applications plus ciblées,

3- Au-delà du choix et de la détermination des composants requis du système de mesure, les difficultés que posent généralement cette technique se situent au niveau de la mise au point des méthodes d'ensemencement, de la réalisation de mesures cohérentes et de l'interprétation physique des résultats tirés de ces mesures. En choisissant un système commercial complet, on pourra concentrer davantage les efforts à l'élaboration de méthodes d'ensemencement plus adéquates et disposer du temps nécessaire pour résoudre les problèmes optiques rencontrés dans ce type de mesure. Ceci permettra aussi de comprendre l'aspect physique des écoulements à mesurer et en fournir les interprétations cohérentes,

4- L'option commerciale permettra également d'imaginer des solutions simples pour le traitement du cas supersonique; cas particulièrement très exigeant sur le plan de la mise au point de la technique, en particulier la synchronisation des appareils, l'ensemencement et l'interprétation des résultats.

Par ailleurs, le choix d'un système PIV commercial permettra de bâtir relativement plus facilement au sein du CRDV une expertise dans le domaine du PIV qui

peut être mise au service des Forces canadiennes, de l'industrie et des universités canadiennes. À titre d'exemple dans le cadre de ce projet, une collaboration existe déjà entre le CRDV et l'Université Laval afin que cette dernière puisse bénéficier de cette expertise.

4.4 Justification du choix de la puissance du laser du système PIV

Rappelons qu'en régime supersonique, la taille des particules d'ensemencement est l'ordre de 0,3 µm. Afin que ces particules puissent réfléchir la lumière qu'elles reçoivent, il faut utiliser un laser puissant. Par ailleurs, plus le niveau d'énergie du laser augmente, plus les coûts sont importants. Dans ce cas, il faut sélectionner un laser ayant le plus haut niveau d'énergie possible au point de vue coût. Comme il est généralement hors de portée d'estimer analytiquement et de façon précise le niveau d'énergie requis pour une application particulière, les données contenues dans la littérature sont d'une aide précieuse pour fixer un niveau d'énergie raisonnable. Un nombre important de travaux de recherche (réf. 11, 12 et 13) affirment le succès d'essais PIV en supersonique pour des puissances de lasers variant entre 70 et 100 mJ/impulsion. Kompenhans & al. (réf. 11) a mesuré des vitesses de l'ordre 600 m/s. Le système PIV utilise un laser de type «Dual Nd-Yag» ayant une puissance de 70 mJ/impulsion et une longueur d'onde de 532 nm. Cependant, seuls les résultats au nombre de Mach de 1,27 sont présentés. La durée d'une impulsion était de l'ordre 20 ns. Le temps séparant deux impulsions successives était de l'ordre de 20 µs en fonction de la vitesse de l'écoulement et du facteur d'agrandissement de l'image. Les auteurs ont utilisé aussi bien la méthode d'intercorrélation que la méthode d'autocorrélation pour le traitement des images PIV. La zone d'observation (ou le domaine de mesure) était de 300 x 200 mm^2 et la résolution spatiale était de l'ordre 1 à 2 mm dans l'écoulement en fonction du facteur d'agrandissement. La précision de la vitesse mesurée restait inférieure à 1 % de la vitesse moyenne de l'écoulement. Par ailleurs, on a utilisé comme particules d'ensemencement des gouttelettes d'huile d'olive de l'ordre de 1 µm de diamètre. Cependant, les auteurs parlent de problèmes particuliers à haute vitesse, comme le problème d'accès optique limité au niveau de la soufflerie, des problèmes de

focalisation de l'image des particules traçantes à cause des vibrations (liées au bruit dans la soufflerie), ainsi que le problème de l'ensemencement à travers la zone de choc.

Par ailleurs, Humphreys & al. (réf. 12), de même que Hunter et al. (réf. 13) ont effectué des mesures PIV en supersonique jusqu'à Mach 6, en utilisant notamment deux lasers «Nd-Yag» déclenchés séquentiellement. L'énergie pour chacun des deux lasers était de 100 mJ/impulsion. L'utilisation de deux lasers en mode séquentiel était nécessaire pour générer des intervalles de temps variables entre deux impulsions successives de l'ordre du nanoseconde, étant donné la vitesse d'essai qui était de l'ordre de 900 m/s, tandis que la durée d'une impulsion était de l'ordre de 10 ns. On a utilisé de la poudre de dioxyde d'aluminium (Al_2O_3) pour générer les particules d'ensemencement de l'écoulement. Le diamètre des particules était de l'ordre de 1 µm. L'ensemencement se fait dans la chambre de tranquillisation. Les dimensions de la feuille du faisceau d'éclairage étaient de 1 mm d'épaisseur et de 80 à 100 mm de largeur. On a utilisé une caméra de 70 mm utilisant un film Tri-X, et l'autocorrélation comme méthode d'analyse des photographies. Les photos ont été prises au voisinage du choc. Cependant, les auteurs relèvent des problèmes d'optique au voisinage du choc par suite de la variation de la densité de l'écoulement à travers le choc.

Par ailleurs, plusieurs auteurs (réf. 14, 15 et 16) s'entendent sur le fait que l'énergie du laser nécessaire à l'éclairage des particules est d'autant plus grande que le diamètre des particules d'ensemencement est faible et que la vitesse est élevée. Adrian (réf. 14) recommande un laser pulsé de 200 mJ/impulsion pour la mesure des vitesses supersoniques proches de 850 m/s. Lee (réf. 15) conseille un laser plus puissant de 300 à 400 mJ/impulsion, alors que Menon (réf. 16) recommande un laser pulsé «Nd-Yag» de 100 à 200 mJ/impulsion

À partir de ce qui précède, il serait visiblement possible d'effectuer des mesures PIV en supersonique en utilisant un laser pulsé de type «Dual Nd:Yag» ayant une puissance dans une gamme de 90 à 200 mJ/impulsion. Le niveau d'énergie à sélectionner dépendra principalement de la disponibilité des fonds alloués à l'achat du système de

mesure. Il va sans dire que le niveau d'énergie choisi dans cette gamme devra permettre d'effectuer des mesures PIV à vitesse élevée ou basse.

4.5 Note sur la soufflerie trisonique

La réalisation de mesures PIV dans la soufflerie supersonique du CRDV est un des objectifs à long terme. L'analyse des données de fonctionnement de la soufflerie fournies par le personnel responsable (réf. 17) montre que pour des nombres de Mach variant de 1,5 à 4, la vitesse d'écoulement dans la veine d'essai varie respectivement dans l'intervalle 432 à 673 m/s. Ces vitesses sont très proches des vitesses mesurées ci-dessus par Kompenhans et al. (réf. 11), par Humphreys et al. (réf. 12), et par Hunter et al. (Réf. 13). Ceci confirme également le choix effectué ci-dessus quant au niveau de puissance du laser requis pour les mesures PIV. Il faut aussi souligner qu'ici c'est la vitesse qui est importante plutôt que le nombre de Mach. Notons que les nombres de Mach dans la soufflerie trisonique sont relativement élevés à cause du fait que la température du fluide est très basse dans la veine d'essai travaillant en succion, ce qui a pour effet de diminuer la vitesse locale du son qui est directement proportionnelle à la température locale.

5.0 SOLUTION PROVISOIRE POUR LE TUNNEL À EAU

Dans le cas du tunnel à eau, il est possible d'utiliser un laser continu de type argon-ion de puissance 5 W auquel on pourrait adjoindre un obturateur de faisceau afin de générer des impulsions d'énergie donnée. Les images peuvent être prises soit par une caméra de type CCD, soit par un appareil de photographie. Le traitement d'images et le calcul de vecteurs de vitesse peuvent être effectués par un logiciel commercial. Un tel concept est illustré à la fig. 5. Il s'agit d'un modèle de système PIV mis au point par TSI. Parmi les composants utilisés, on distingue le laser continu de type argon-ion auquel on a adjoint un modulateur de faisceau pour la génération d'impulsions. On remarque aussi l'acheminement du faisceau laser par fibre optique jusqu'au dispositif de divergence de la lumière, ce qui permet d'éclairer aisément le plan de mesure d'intérêt.

ENTRY LEVEL PIV SYSTEM WITH ARGON-ION LASER

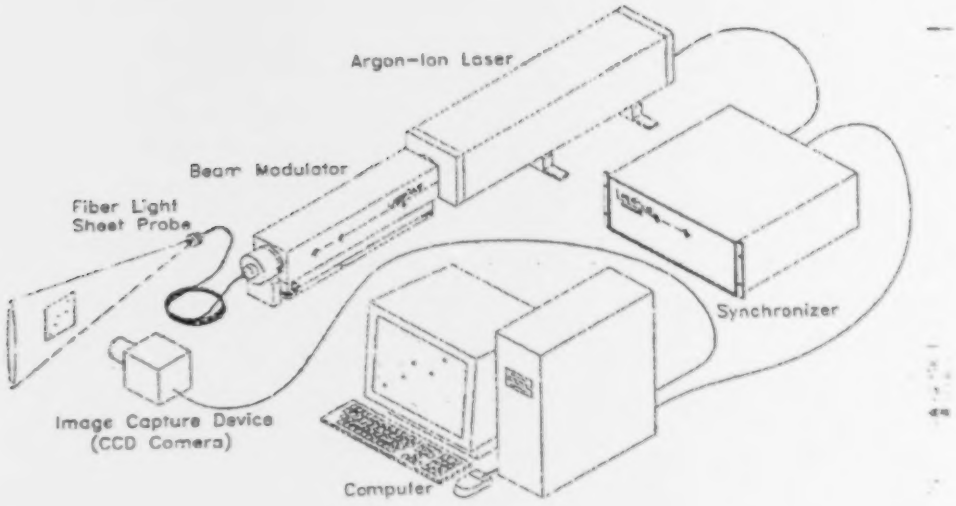


Illustration shows a basic argon-ion laser-based system with some options.

FIGURE 5 - L'agencement des composants d'un système PIV de TSI utilisant un laser continu

Notons qu'au CRDV, on dispose d'un laser de type krypton-ion de puissance continue de 600 mW. Ce laser est installé sur un tunnel à eau pour des travaux de visualisations qualitives. Il a été notamment utilisé (réf. 18) pour visualiser l'écoulement dans la chambre de combustion d'une statofusée. Cependant, ce laser ne peut pas être utilisé sur un système PIV, car sa puissance est insuffisante pour couvrir toute la gamme des vitesses qu'on désire mesurer. Il sera donc destiné uniquement aux travaux de visualisation qualitative.

5.1 Les éléments clés de réalisation d'une telle solution

Afin de réaliser cette solution, l'installation d'un générateur d'impulsions est nécessaire. Celui-ci pourrait être un dispositif rotatif de type mécanique ou électromécanique placé directement à la sortie du faisceau laser continu. On pourrait également utiliser une barrière électronique à la caméra. Le rôle du générateur d'impulsions (ou l'obturateur de faisceau) est de produire un effet stroboscopique, en pulsant le laser continu.

Les images de particules peuvent être prises au moyen d'une caméra CCD ou un appareil photo classique, comme la Nikon 35 mm dont on dispose. Cette caméra fonctionne aussi bien en mode manuel qu'en mode automatique. Cependant, l'utilisation d'une caméra de type CCD est certainement préférable. Un synchroniseur électronique entre le générateur d'impulsions et la caméra est requis. Les fig. 6 et 7 montrent deux exemples de systèmes PIV (réf. 19 et 20) utilisant le même principe décrit ci-dessus. On note le synchroniseur installé entre l'obturateur à haute vitesse placé à la sortie d'un laser continu de type argon-ion et la caméra de type CCD. La synchronisation est effectuée à 25 Hz dans le premier cas et à 30 Hz dans le second.

Dans le cas d'une caméra de type CCD, l'acquisition des images dans le format désiré serait automatique et le travail nécessaire à la génération des images à traiter s'en trouve très simplifié. Ceci n'est pas le cas si on utilise une caméra de photographie classique. En effet, il faudra dans ce cas développer le négatif, numériser les photos obtenues à l'aide d'un scanner ou d'un procédé optique et ensuite les acquérir et les traiter sur ordinateur. Les formats d'acquisition peuvent être choisis en fonction du logiciel de traitement d'images, en particulier le format TIF compatible avec la plupart des logiciels

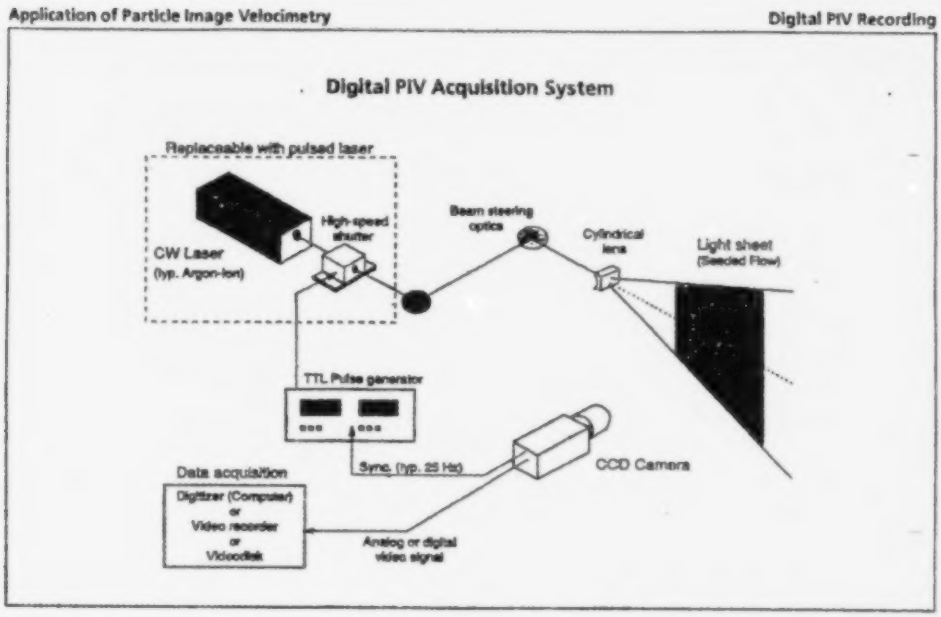


FIGURE 6 - Système PIV utilisant un laser continu et un obturateur électronique

commerciaux disponibles sur le marché. D'autres formats de conversion (par exemple, BMP) sont également possibles grâce au logiciel New Adobe Photoshop Image.

5.2 Nécessité d'un logiciel adapté pour le traitement d'images PIV

Au-delà de l'obtention d'images PIV exploitables, il faut pouvoir les dépouiller pour en extraire le champ de vitesse et ainsi être en mesure d'interpréter la validité des résultats obtenus. Ainsi, l'acquisition d'un logiciel pour le traitement d'images PIV est

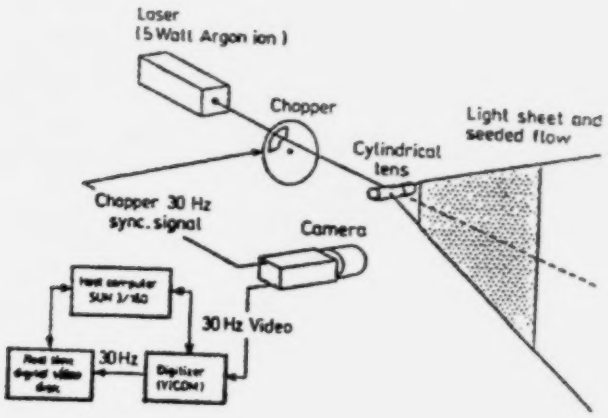


FIGURE 7 - Système PIV utilisant un laser continu et un obturateur mécanique

fondamentale. Le logiciel procure également une aide à la prise de décision quant aux améliorations futures à apporter pour la mise au point de la méthode de mesure. Dans ce contexte, le choix d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données doit tenir compte des futures extensions de la chaîne de mesure. Par conséquent, le critère du degré de compatibilité ou de flexibilité est un paramètre déterminant dans le choix du logiciel. Il faudra en particulier que le logiciel soit accessible à la programmation, c'est-à-dire à l'implantation de routines nécessaires pour contrôler des instruments de mesure ajoutés au besoin. Plusieurs compagnies commerciales offrent des logiciels de traitement d'images PIV parmi lesquels on peut citer: VISIFLOW, offert par AEA Technology, INSIGHT, offert par TSI, VidPid, offert par OFS, et Davis 5, offert par LaVision. Certains de ces logiciels sont relativement plus puissants que d'autres et cela évidemment se répercute directement sur le prix.

5.3 Choix de la méthode d'acquisition et de traitement des données

Compte tenu de la nature tourbillonnaire des écoulements à mesurer, la plus simple méthode d'acquisition et de traitement des données à utiliser est la méthode d'intercorrélation ou de corrélation croisée (réf. 7). Celle-ci permet d'éliminer le problème

d'ambiguïté de direction de vitesse et du même coup d'éviter l'achat et l'installation d'un dispositif de résolution d'une telle ambiguïté. L'emploi d'une cette technique de traitement d'images aiderait également à faciliter l'interprétation des résultats. Notons cependant que les logiciels commerciaux fonctionnent généralement selon les deux méthodes, c'est-à-dire celle dite de corrélation croisée et celle dite d'autocorrélation.

5.4 Ensemencement de l'écoulement

Pour une vitesse donnée, les particules d'ensemencement doivent être d'une taille minimale pour ne pas perturber l'écoulement et de diamètre suffisant pour réfléchir correctement la lumière. On utilise souvent des billes de polystyrène 1 µm de diamètre et plus. Un laser continu de type argon-ion de puissance environ 5 W munis d'un générateur d'impulsions est généralement utilisé pour les mesures PIV dans l'eau. L'énergie par impulsion est égale à la puissance du laser multipliée par la durée d'une impulsion. Cette énergie est de l'ordre de 1 mJ ou moins pour une puissance totale continue de 5 W. Si une durée de 0,25 ms/impulsion est choisie, la vitesse maximale qu'on peut mesurer est de l'ordre de 2 m/s. Pour un laser de puissance donnée, on peut modifier l'énergie par impulsion en faisant varier la durée de celle-ci. Ceci peut être réglé par l'obturateur du faisceau laser ou le générateur d'impulsion. Cependant, la vitesse maximale à mesurer est en grande partie limitée par la capacité du type d'obturateur utilisé à générer de courts laps de temps entre deux impulsions successives (donc entre deux images successives). Selon l'usage et les coûts envisagés, l'obturateur peut être de type électromécanique ou de type électronique.

Dans le cas du tunnel à eau du CRDV, des tests d'ensemencement ont été effectués avec des billes de polystyrène de 100 µm de diamètre, en utilisant le laser continu de 0,6 W de puissance. Malgré cette faible puissance, on a constaté que les billes de polystyrène réfléchissent suffisamment de lumière pour permettre d'effectuer des mesures PIV. Ceci a été confirmé par la suite grâce à des images prises par une caméra Sensicam de type CCD prêtée par la firme Optikon. La visualisation de ces images à

l'aide du logiciel New Adobe Photoshop Image et leur dépouillement à l'aide d'une version démo du logiciel Davis 5 de LaViSion a permis de constater, puis de conclure que la concentration des billes de polystyrène et leurs diamètre convenable peut être ajusté in situ en fonction de la vitesse d'essai.

5.5 Remarques

Pour conclure ce chapitre, il est important de noter que la solution proposée pour le tunnel à eau reste provisoire. Elle a été conçue accessoirement comme recours à défaut d'une solution globale, c'est-à-dire à défaut de l'installation immédiate d'un système PIV intégré. Il est important de souligner également que cette démarche nécessite un certain investissement, notamment certaines réalisations techniques importantes comme la synchronisation de la caméra et du laser.

Par ailleurs, comme l'indique bien le titre de ce paragraphe, la solution provisoire serait valable uniquement pour la mesure de très basses vitesses dans l'eau. Cela ne va pas de pair avec les objectifs visés à long terme, à savoir la mesure de vitesses plus élevées et surtout de vitesses supersoniques. Cependant, bien que cette solution offre des possibilités limitées, celle-ci reste très valable pour des applications ciblées à basse vitesse. Dans le cadre de notre projet, il est évident que la solution consiste à installer un système PIV intégré capable d'offrir la possibilité de réussir des mesures PIV en vitesse subsonique et supersonique.

6.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce mémorandum traite de la faisabilité de l'implantation d'un système PIV au CRDV pour la mesure des écoulements subsoniques et supersoniques. Pour atteindre un tel objectif, les différentes options possibles ont été discutées et leurs avantages et inconvénients ont été clairement soulignés. Les différents composants requis pour un système PIV classique ont été définis. Compte tenu de la particularité de notre application

qui requiert un système PIV capable d'effectuer la mesure des écoulements à basse vitesse et à grande vitesse, il était nécessaire d'effectuer une recherche particulière sur les caractéristiques des composants les plus importants en s'appuyant sur les données fournies en particulier dans la littérature spécialisée dans le domaine du PIV.

Ce mémorandum recommande une solution qui tient compte des coûts et des objectifs à atteindre. Plus précisément, on a opté pour le choix d'un système PIV de type commercial. Ce choix milite en faveur d'un système PIV intégré offrant toute la flexibilité nécessaire. Les raisons qui ont amené à un tel choix ont également été soulignées.

Pour tout système PIV, deux composants importants influencent le prix total de façon significative, à savoir la source d'illumination et la caméra pour la prise d'image qui doit être la plus sensible possible et offrant la meilleure résolution. Afin de tenir compte du budget disponible, la nécessité d'une solution optimale qui tient compte à la fois du but recherché et des contraintes financières existantes devenait cruciale. Le choix a été fixé sur le système le plus abordable possible au point de vue coût et offrant les meilleures possibilités acceptables pour la réalisation des mesures. Le système PIV retenu incorpore en particulier un laser pulsé de type «Dual Nd:Yag» produisant une énergie de 200 mJ/impulsion et une caméra CCD rapide de type SensiCam adaptée pour la mesure des écoulements à haute vitesse. La sélection du laser a été effectuée de façon à permettre librement le réglage sur une gamme assez large à la fois du temps entre deux impulsions successives et de l'énergie par impulsion. Une telle flexibilité est nécessaire pour la mesure d'une vaste gamme de vitesse.

Ensuite, on a souligné l'importance d'utiliser l'option de traitement d'images PIV dite corrélation croisée. En effet, grâce à cette méthode, il n y a pas lieu de résoudre le problème d'ambiguïté de direction de vitesse lors de la mesure des écoulements tourbillonnaires. Par conséquent, ceci élimine la nécessité d'installer le dispositif à miroir rotatif requis pour une telle tâche. Par ailleurs, cette méthode donne de très bons résultats dans la plupart des cas.

Accessoirement, une solution provisoire pour les tests dans le tunnel à eau a été proposée. Cette solution ne serait valable que pour la mesure des écoulements à basse vitesse, soit de l'ordre de 2 à 4 m/s. Celle-ci nécessite notamment l'installation d'un dispositif d'obturation de la lumière d'un laser continu d'une puissance d'au moins 5 W. Le but d'un tel dispositif est de générer un faisceau lumineux pulsé. Pour être efficace, ce générateur d'impulsion doit nécessairement être synchronisé avec le mécanisme d'ouverture de la caméra, d'où l'importance d'installer d'un synchroniseur. Cette solution peut par ailleurs nécessiter également un mécanisme de résolution de l'ambiguïté de direction de vitesse pour la mesure des écoulements tourbillonnaires lorsque la méthode de traitement dite autocorrélation est utilisée.

Pour mettre en oeuvre cette solution un logiciel pour l'acquisition, le traitement et le post-traitement des images PIV est nécessaire. Le choix du logiciel doit tenir compte des extensions futures de l'installation provisoire. Dans ce cadre, la liste des logiciels commerciaux susceptibles de répondre à ces besoins a été dressée. On a également souligné que si l'opération de synchronisation doit être mise au point au CRDV, le logiciel à choisir doit offrir la possibilité de programmation afin d'ajouter les routines nécessaires. Enfin, l'installation d'un système PIV intégré de type commercial rend non nécessaire la mise en oeuvre d'une telle solution provisoire pour le tunnel à eau.

7.0 REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier tous les membres du Groupe Propulsion du CRDV plus particulièrement Rob Stowe, Rocco Farinaccio et Paul Harris, pour l'aide apportée et leur disponibilité, ainsi que le personnel du Groupe de mécanique du vol pour leur collaboration.

8.0 RÉFÉRENCES

1. R. J. Adrian "*Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*", Annu. Rev. Fluid. Mech. 1991, 23: 261-304.

2. M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans "*Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*", Springer-Verlag, New-York, 1998.

3. I. Grant "*Particle Image Velocimetry: A Review*", Proc Instn Mech Engrs Vol. 211, Part C, IMechE 1997, 55-76.

4. J. Westerweel "*Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry*", Meas. Sci. Technol. 8 (1997), 1379-1392.

5. R. D. Keane and R. J. Adrian, "*Optimization of Particle Image Velocimeters, Part I: Double Pulsed Systems*", Meas. Sci. Technol. 1 (1990), 1202-1215.

6. R. D. Keane and R. J. Adrian, "*Optimization of Particle Image Velocimeters, Part II: Multiple Pulsed Systems*", Meas. Sci. Technol. 2 (1991), 963-974.

7. R. D. Keane and R. J. Adrian, "*Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images*", Applied Scientific Resaerch 49: 191-215, 1992

8. "*Advances in Fluid Flow Diagnostics*", seminar presented by TSI Inc., Fluid Mechanics Division, McGill University, 12 May 1998.

9. S. Dagusta et al "*A Two-Color Particle Imaging Velocimetry System for Supersonic Flow Studies*" AIAA 96-2798, 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 10-12, 1995/San Diego.

10. J. Kompenhans "*Considerations for the Design of a PIV System*", Application of Particle Image Velocimetry: Theory and Practice, PIV Course 1997, organized by AG STAB, CQV and ERCOFTAC Pilot Center `Germany North`, University of Oldenburg, Delf University of Technology and DLR, Gottingen, March 3-7, 1997.

11. J. Kompenhans et al."*Investigation of Unsteady Flow Fields in Wind Tunnels by Means of Particle Image Velocimetry*" Application of Particle Image Velocimetry: Theory and Practice, PIV Course 1997, organized by AG STAB, CQV and ERCOFTAC Pilot Center `Germany North`, University Of Oldenburg, Delf University of Technology and DLR, Gottingen, March 3-7, 1997

12. J.M. Humphreys et al. "*Application of Particle Image Velocimetry to Mach 6 Flows*" SPIE Vol. 2052, Laser Anemometry Advances and Applications (1993).

13. W. Hunter et al. "*Application of Point and Global Laser Velocimeter Techniques to Supersonic Flows*", 80th Supersonic Tunnel Association Meeting, European Transonic Windtunnel Gmbh, October 18-19, 1993, Cologne, Germany.

14. R. J. Adrian, Professor at the University of Urbana-Champain (USA), "*A personal communication*", June 1998.

15. T. Lee, Professor at McGill University (Montreal), "*A personal communication*", May 1998.

16. R. Menon, Manager of the Fluid Mechanics Intrumentation Division, TSI, "*A personal communication*", May 1998.

17. B. Girard, Groupe mécanique de vol, "*Communication personnelle: données de la soufflerie trissonique*", CRDV, mai 1998.

18. R. A. Stowe et al "*Modeling and Flow Visualization of Mixing in a Ducted Rocket Combustor*", AIAA-98-3768, 34th Joint Propulsion Conference, Cleveland, July 1998.

19. C. Willert "*Evaluation of Digital PIV Recordings*" Application of Particle Image Velocimetry: Theory and Practice, PIV Course 1997, organized by AG STAB, CQV and ERCOFTAC Pilot Center `Germany North`, University of Oldenburg, Delf University of Technology and DLR, Gottingen, March 3-7, 1997.

20. Willert, C.E, Gharib, M. "*Digital Particle Image Velocimetry*" Application of Particle Image Velocimetry: Theory and Practice, PIV Course 1997, organized by AG STAB, CQV and ERCOFTAC Pilot Center `Germany North`, University of Oldenburg, Delf University of Technology and DLR, Gottingen, March 3-7, 1997.

ANNEXE A

Système PIV retenu
Flow Master 3S PIV/PTV System/La ViSion

Cette annexe donne un aperçu des composants du système PIV (FlowMaster 3S PIV/PTV System) offert par la compagnie allemande LaVision et retenu dans notre cas:

Flow Master 3S PIV/PTV System with Cross-correlation-Camera including:

1- CCD-acquisition-System: Camera, Computer, PIV/PTV Software

. Progressive-scan-camera (12Bit digital) with dual-frame-technique for cross-correlation with 200 ns (two images within 200 ns),
. CCD-resolution: 1280x1024 Pixels, Pixel size: 6.7 µm x 6.7 µm,
. 2-stage peltier cooler with forced air cooling, regulated to -15°C,
. 12.5 MHz Pixel clock, 8 frames/s, Cross-correlation mode 4frames/s,
. Digtal framegrabber,
. Image acquisition and processing software DaVis 5.x (for Windows NT, 32 bit), including the PIV/PTV Software package,
. Pentium II 300 MHz, 128 MB RAM, 4 GB HD, CD-ROM, 17" monitor,
. Camera and computer accessories: movable electronic-rack for PC and monitor camera lens, high quality tripod for FlowMaster camera,

2- Double Pulse Nd-Yag laser:

. Continuum Surelite I-10 PIV Laser, Pulse energy 2 x 200 mJ @532 nm, repetition rate 10 Hz,

3- Laser Sheet Optics:

Laser optic based on adjustable spherical and cylindrical Galilei telescopes, lens material: quartz, adjustable divergence and focus, aperture 23 mm.

4- Controlling System and Peripherals (Synchronization Unit):

. Programmable Timing Unit (PTU),
. Time resolution: 50 ns; externally triggering,
. Two trigger input channels possible,
. 16 output channels,
. Minimum time interval: 100 ns,
. Jitter to external event: 12 ns
. Jitter during sequence: 1ns

SANS CLASSIFICATION
AIII

LAVISION

PIV/PTV software package

There are a variety of experimental setups possible in PIV/PTV-measurements. The LaVision PIV/PTV software package covers the most important standard methods, which usually consist of exposing the seeding particles 2 or more times in a single image or in two different images with LaVision's *FlowMaster* cross-correlation camera.

The first step in any image processing task is to enhance the original image, if necessary, such that the following PIV/PTV-algorithms work better. The software provides a variety of preprocessing filter and noise reduction mechanisms to enhance the quality of the image.

The standard Particle-Imaging-Velocimetry(PIV)-algorithm consists of taking a subsection of the image (usually, for example, 64x64 pixels), for which a single average velocity vector should be calculated. This requires that in this subsection, of course, are enough 'good' particles visible. Then the (auto- or cross-)correlation of the section(s) is calculated, and the highest peak in the correlation-image (also 64x64 pixels big) is the wanted displacement, from which a velocty vector can be derived by dividing by the time difference dt between the two (or more) exposures.
The correlation function is implemented by a fast FFT-algorithm instead of simply using the mathematical definition of the correlation function.

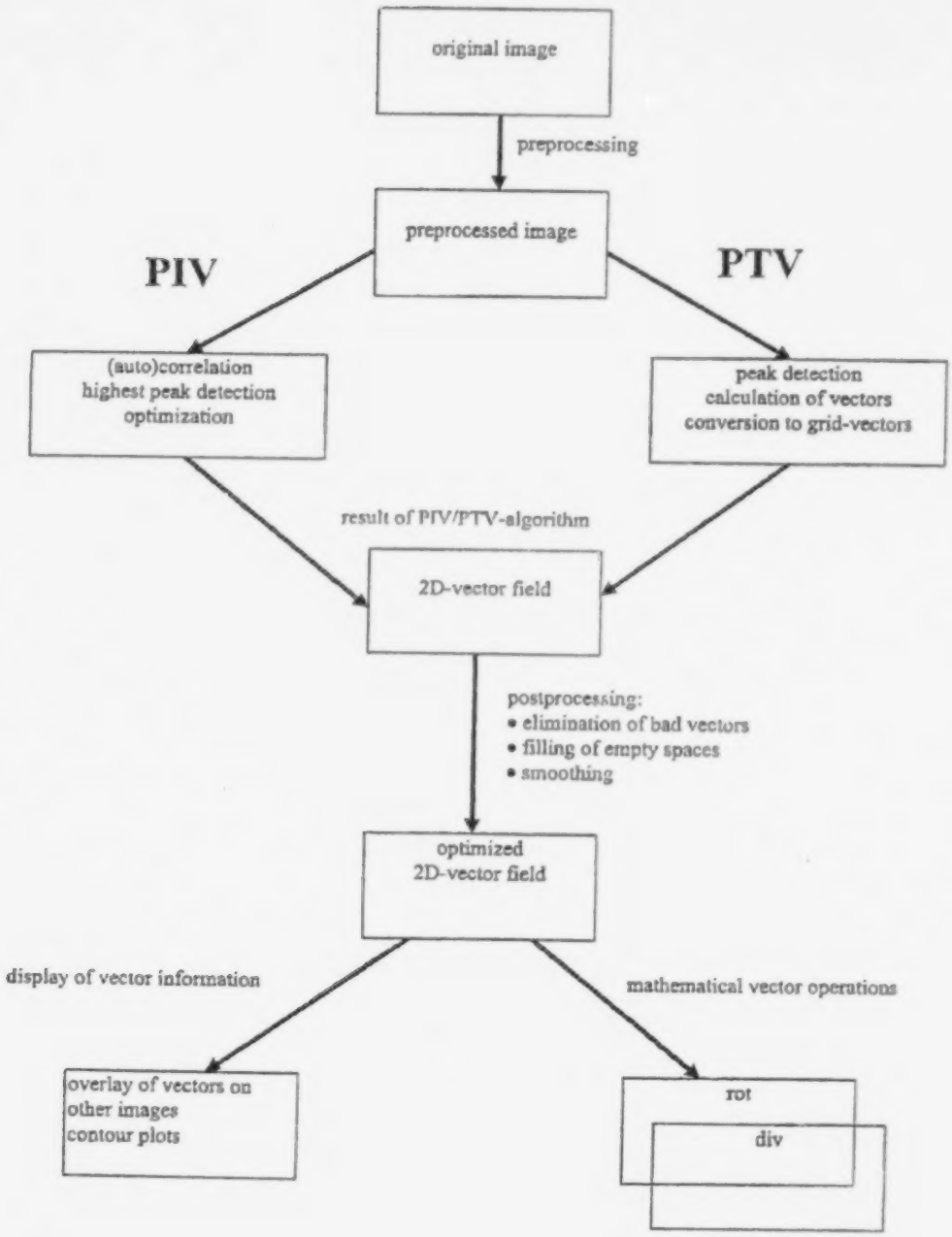
There are other algorithms like cross-autocorrelation, which work better in some instances. All those algorithms are implemented by the LaVision-PIV/PTV-software package.

In Particle-Tracking-Velocimetry (PTV) first the image is analysed to find the exact position of each particle visible. Then the PTV-algorithm tries to find matching particle pairs, from which a velocity vector is calculated. Again, depending on the experimental setup (2 or more particle images, equally spaced?, etc.), different algorithms are used for optimal results.

Both methods, PIV and PTV, finally provide a two-dimensional velocity field. There are further processing methods implemented to, for example, eliminate 'bad' vectors, to smooth the velocity field, or to compute strain and vorticity fields from the vector field.

SANS CLASSIFICATION
AIV

LAVISION



DISTRIBUTION INTERNE

DREV TM-9826

1	-	Directeur général adjoint
1	-	Scientifique en chef
6	-	Bibliothèque des documents
1	-	C/Systèmes de lancement
1	-	C/Matériaux énergétiques
1	-	C/Effets d'armes
1	-	Dr S. Bouziane (auteur)
1	-	M. R. Farinaccio
1	-	M. R.A. Stowe
1	-	M. P. Harris
1	-	Dr. C. Dubois
1	-	M. F. Lesage
1	-	M. É. Fournier
1	-	Dr J. Rapanotti

EXTERNAL DISTRIBUTION

DREV TM-9826

1 - DRDCGI

1 - DRDCIM (exemplaire non relié)

1 - DRDD

1 - DSTM

1 - DSTL

1 - DSTA

3 - Collège militaire royal du Canada.
Department de génie mécanique

Attn: Dr M.F. Bardon

Dr J.E.D. Gauthier

Département de mathématiques et d'informatique
Attn: Dr Gilles Labonté

- Université Laval
Department de génie mécanique

3 - Dr A. De Champlain

FICHE DE CONTRÔLE DU DOCUMENT

1. PROVENANCE (le nom et l'adresse)	2. COTE DE SÉCURITÉ (y compris les notices d'avertissement s'il y a lieu)
Sahraoui Bouziane DREV	Sans classification

3. TITRE (Indiquer la cote de sécurité au moyen de l'abréviation (S, C, R ou NC) mise entre parenthèses, immédiatement après le titre.)
Implantation d'un système de vélocimétrie par image de particules (PIV) pour la mesure et la visualisation des écoulements subsoniques et supersoniques

4. AUTEURS (Nom de famille, prénon et initiales. Indiquer les grades militaires, ex.: Bleau, Maf. Louis E.)
S. Bouziane

5. DATE DE PUBLICATION DU DOCUMENT (mois et année)	6a. NOMBRE DE PAGES	6b. NOMBRE DE REFERENCES
Mars 1999	41	20

7. DESCRIPTION DU DOCUMENT (La catégorie du document, par exemple rapport, note technique ou mémorandum. Indiquer les dates lorsque le rapport couvre une période définie.)
DREV-Technical Memorandum

8. PARRAIN (le nom et l'adresse)

9a. NUMÉRO DU PROJET OU DE LA SUBVENTION (Spécifier si c'est un projet ou une subvention)	9b. NUMÉRO DE CONTRAT
3ea22	

10a. NUMÉRO DU DOCUMENT DE L'ORGANISME EXPÉDITEUR	10b. AUTRES NUMÉROS DU DOCUMENT
DREV-TM-9826	N/A

11. ACCÈS AU DOCUMENT (Toutes les restrictions concernant une diffusion plus ample du document, autres que celles inhérentes à la cote de sécurité.)

- [x] Diffusion illimitée
- [ ] Diffusion limitée aux entrepreneurs des pays suivants (spécifier)
- [ ] Diffusion limitée aux entrepreneurs canadiens (avec une justification)
- [ ] Diffusion limitée aux organismes gouvernementaux (avec une justification)
- [ ] Diffusion limitée aux ministères de la défense
- [ ] Autres (préciser)

12. ANNONCE DU DOCUMENT (Toutes les restrictions à l'annonce bibliographique de ce document. Cela correspond, en principe, aux données d'accès au document (11). Lorsqu'une diffusion supplémentaire (à d'autres organismes que ceux précisés à la case 11) est possible, on pourra élargir le cercle de diffusion de l'annonce.)

SANS CLASSIFICATION

COTE DE LA SÉCURITÉ DE LA FORMULE

(plus haut niveau du titre, du résumé ou des mots-clefs)

13. SOMMAIRE (Un résumé clair et concis du document. Les renseignements peuvent aussi figurer ailleurs dans le document. Il est souhaitable que le sommaire des documents classifiés soit non classifié. Il faut inscrire au commencement de chaque paragraphe du sommaire la cote de sécurité applicable aux renseignements qui s'y trouvent, à moins que le document lui-même soit non classifié. Se servir des lettres suivantes: (S), (C), (R) ou (NC). Il n'est pas nécessaire de fournir ici des sommaires dans les deux langues officielles à moins que le document soit bilingue.)

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de recherche dans le domaine des écoulements propulsifs dirigé par le Groupe Propulsion du CRDV, en collaboration avec la compagnie Allied Signal et l'Université Laval. Il porte plus précisément sur l'implantation au CRDV d'un outil métrologique de type optique adapté pour la mesure du champ de vitesse dans les écoulements subsoniques et supersoniques se développant dans (et autour) des organes de propulsion des véhicules volants. Il s'agit précisément d'un système de vélocimétrie laser par image de particules (PIV). Au CRDV, les applications pratiques de ce type de métrologie au profit des Forces canadiennes sont multiples. À titre d'exemple, on peut citer la mesure du champ de vitesse de l'écoulement dans la chambre de combustion d'une statofusée, autour des ailettes de guidage équipant la tuyère d'une fusée à propergol solide, de même qu'autour des profils aérodynamiques, tels que des modèles de missiles. L'objectif d'installation d'un tel outil est de pouvoir effectuer la mesure du champ de vitesse partout dans le domaine de mesure d'intérêt de façon simultanée et, par la même occasion, disposer de données expérimentales pour la validation des codes et des calculs numériques (CFD) existants. S'agissant de l'implantation d'un nouvel outil de mesure, plusieurs options possibles ont été étudiées. En particulier, ce mémorandum présente les avantages et inconvénients associés à chacune des démarches possibles, ainsi que la solution retenue. La démarche adoptée dans le cadre de ce projet consistait à déterminer la voie la plus commode possible aussi bien au point de vue coût d'installation qu'au point de vue réalisation des objectifs visés. Une description générale du système de mesure complet est fournie dans ce document. L'accent est placée sur la définition et la sélection des composants pour nos besoins particuliers, et enfin le type de système PIV commercial retenu dans le cadre de ce projet.

14. MOTS-CLÉS, DESCRIPTEURS OU RENSEIGNEMENTS SPÉCIAUX (Expressions ou mots significatifs du point de vue technique, qui caractérisent un document et peuvent aider à le cataloguer. Il faut choisir des termes qui n'exigent pas de cote de sécurité. Des renseignements tels que le modèle de l'équipement, la marque de fabrique, le nom de code du projet militaire, la situation géographique, peuvent servir de mots-clés. Si possible, on doit choisir des mots-clés d'un thésaurus, par exemple le "Thesaurus of Engineering and Scientific Terms (TESTS)". Nommer ce thésaurus. Si l'on ne peut pas trouver de termes non classifiés, il faut indiquer la classification de chaque terme comme on le fait avec le titre.)

Vélocimétrie par image de particule (PIV)

Systèmes PIV

Lasers

Caméras

Autocorrélation

Intercorrélation (corrélation croisée)

Mesure de vitesse

Écoulement subsonique

Écoulement supersonique

Tunnel à eau

Soufflerie

Véhicule volant

«Thrust Vector Control (TVC)» ou dispositif de contrôle du vecteur-poussée (CVP)

Propulsion de fusée

Chambre de combustion de statofusée

#510521

SANS CLASSIFICATION

COTE DE SÉCURITÉ DE LA FORMULE

(plus haut niveau du titre, du résumé ou des mots-clefs)